

中国科大首次实现量子微纳卫星与可移动地面站间的实时星地量子密钥分发

本报讯 中国科大潘建伟、彭承志、廖胜凯等，联合济南量子技术研究院、中国科学院上海技术物理研究所、微小卫星创新研究院等单位组成的研究团队，在国际上首次实现量子微纳卫星与小卫星、可移动地面站之间的实时星地量子密钥分发，在单次卫星通过期间实现了多达100万比特的安全密钥共享。在此基础上，联合团队和南非开普敦布什（Stellenbosch）大学科研团队合作，在中国和南非之间相隔12900多公里的空间上建立了量子密钥，完成对图像数据“一次一密”加密和传输。该工作为实用化卫星量子通信网络铺平了道路。相关研究成果于3月20日在线发表在国际学术期刊《自然》杂志上。

通信安全是国家信息安全和经济社会发展的重要基础。基于量子密钥分发的量子保密通信是迄今唯一可实现“信息论可证”安全的通信方式，将大幅提升现有信息系统的传输水平。目前，基于光纤链路的城域城际量子通信已发展成熟并初步得以应用。为实现远距离乃至全球化的量子保密通信，需要克服光纤存在的固有损耗以及难以覆盖全球的问题。利用卫星平台进行自由空间量子密钥分发，能够有效克服这些限制，实现全球范围的量子保密通信。

中国科大与多家科研机构协同攻关，在星地量子通信方面开展了一系列开创性研究。中国科大牵头研制的“墨子号”量子科学实验卫星在国际上首次实现了星地量子密钥分发，并与地面光纤量子保密通信骨干网“京沪干线”构成首个天地一体化广域量子保密通信网络，充分验证了基于卫星实现全球化量子通信的可行性。由于“墨子号”量子卫星无法直接覆盖全球且成本较高，发射多颗低成本量子微纳卫星并实现组网运行，已成为构建高效率、实用化、全球化量子通信网络的迫切需求。

朝向这一目标，研究团队成功突破了低成本小型化诱骗态量子光源技术、复合激光通信的实时密钥提取技术、基于卫星姿控的高精度跟踪等关键技术，完成星地量子密钥分发载荷、量子微纳卫星平台研制，载荷重量约23kg，相比“墨子号”降低约一个数量级，光源频率提升约6倍，密钥生成时效性由数天时间完成提高到单轨实时成码。在系列技术突破的基础上，团队研制的国际首颗量子微纳卫星“济南一号”于2022年7月27日成功发射入轨。研究团队进一步发展了小型化地面站系统，相对第一代重约13吨的地面站，重量降低了约两



量子微纳卫星“济南一号”星地量子密钥分发实验示意图

数量级达到低于100kg的水平，能够快速部署，可适应城市、山区、高原等各类环境，原理上已可支撑移动量子通信。

在本研究工作中，量子微纳卫星与济南、合肥、南山、武汉、北京、上海、南非开普敦布什等地面光学站建立光链路，实现实时星地量子密钥分发实验。星地量子诱骗态光源平均

每秒发送2.5亿个信号光子，结合上下行光通信实现密钥的实时提取，一次过轨对接实验可生成250kbits-1Mbps的安全密钥，平均成码率可达3kpbs。以卫星作为可信中继，研究团队进一步实现了相距12900km的北京站和南非开普敦布什站之间的密钥共享和数据中继。

该研究工作为未来发射多颗微纳卫星构建“量子星座”奠定了坚实基础，不仅为大规模实用化量子通信网络的建设提供了关键技术支撑，更为量子互联网的全球部署开辟了新的发展路径。

《自然》杂志审稿人称该成果是“技术上令人钦佩的成就”，代表了“基于可信节点量子星座提供广域星地量子密钥分发服务的长足进步”，并“展示了卫星量子密钥分发技术的成熟，代表了实现量子与经典通信卫星星座的里程碑”。《自然》杂志还以“向远距离安全量子通信的现实飞跃”为题配发研究简报进行报道，《自然》播客、英国著名科学杂志《新科学家》等也对该工作进行了专题报道。

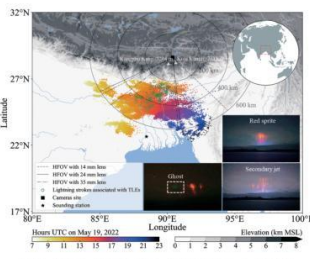
（合肥微尺度物质科学国家研究中心 物理学院 中国科学院量子信息与量子科技创新研究院 科研部）

中国科大揭秘喜马拉雅上空神奇的“精灵烟花”

本报讯 中国星空摄影师安久和董书畅曾于2022年5月19日深夜在青藏高原普莫雍错湖北岸，有幸记录到上百个“红色精灵”，其中不少是跃动的“舞蹈精灵”，还有罕见的“次生喷流”，以及亚洲首例夜间电离层底部绿色发光现象——“鬼火精灵”。这场盛宴引发了全球各地爱好者的广泛关注，并被央视等多家媒体竞相报道。

中国科大特聘教授团队近期发表在国际知名学术期刊《Advances in Atmospheric Sciences》上的文章，揭秘了“点燃”这场盛大的“精灵烟花”的幕后推手——闪电和雷暴。

由于缺乏分析所需的精确时间信息，团队提出了基于卫星轨迹与星场推断视频时间的方法，从而确定两段观测视频中“精灵”发生的时间及诱发它们的母体闪电。审稿专家高度评价了该方法的创新性，认为“这一方法为众多的公民科学家参与科学观测提供了可靠的校时手段”。



诱发“红色精灵”群的母体闪电和南亚雷暴

研究发现，母体闪电主要为大峰值电流的正极性闪电，发生在从恒河平原延伸至青藏高原南麓的中尺度对流复合体云层降水区。研究观测记录了南亚单次雷暴过程中最多的精灵闪电，表明该地区雷暴具备与美国大

平原和欧洲近海雷暴相似的中高层放电能力，甚至能够孕育出更复杂的放电形态，它们产生的物理化学效应可能对圈层耦合可能存在重要影响。

文章上线后，美国科学促进会（AAAS）主办的全球科学新闻发布平台“EurekAlert!”以《Unveiling the mysterious “sprite fireworks” over the Himalayas》为题，对该项成果在其主页头条进行了报道。该平台是由美国科学促进会运营的独立编辑、非营利的新闻发布平台，为公众提供来自世界顶尖科研机构和高校的前沿研究和重要科学新闻。

值得一提的是，摄影师安久凭借此次拍摄的作品《宇宙的烟火》获得了英国格林尼治皇家天文台主办的2023年度天文摄影师大赛星野组世界冠军。这一作品不仅展现了“精灵”放电的壮丽景象，也进一步引发了公众对极端天气现象的关注。

（地球和空间科学学院 科研部）

中国科大揭示东北地区深源地震与长白山火山活动控制机制

本报讯 近日，中国科大地球和空间科学学院张海洋教授团队联合英国布里斯托大学Robert Myhill博士，利用远震双差层析成像技术，揭示了太平洋俯冲板块在东北下方地幔过渡带的形态变化及其对长白山火山活动和深源地震的控制作用。相关研究成果3月21日发表在《自然·通讯》上。

新生代火山在中国东北地区广泛分布，其中长白山火山是规模最大的一个。它因公元946年至947年间发生的千年大喷发而闻名，这是全球有记录以来规模最大的火山喷发事件之一。长白山火山距离日本海约1500公里，是一个典型的板内火山。目前，关于长白山火山的形成机制仍存在争议。“大地幔楔”机制认为俯冲在地幔过渡带的太平洋俯冲板块会发生脱水反应产生流体进入地幔楔产生部分熔融。然而，这种机制难以解释为何新生代晚期（<1.5Ma）的火山活动并未沿俯冲带走向广泛分布，而是集中于特定区域。“板片空窗”机制则提出俯冲板片下方的热物质通过板片存在的一个缺口上涌，为长白山火山提供深部岩浆来源。然而位于地幔过渡带的俯冲板块是如何形成一个缺口的，仍然是一个未解之谜。除了广泛的板内火山和岩浆活动外，中国东北地区的另一个显著地质特征是在长白山火山以东约300千米存在深源地震（深度范围为

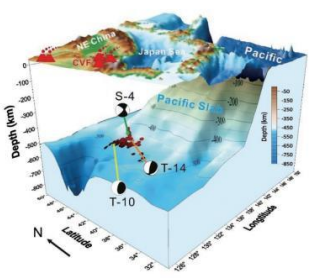


图 东北亚地区俯冲的太平洋板块几何形态、深源地震簇（红点）以及晚新生代火山分布。

400至650千米）。通常认为，深源地震的形成机制包括脱水致脆、相变断层以及地幔热对流等。这些机制主要受温度条件的控制，而东北亚地区俯冲带的热化结构走向向基本保持不变。因此，控制深源地震集中出现在这一特定区域的机制尚不清楚。

研究团队利用全球地震台站接收到的东北亚地区地震到时数据，利用多尺度双差层析成像构建了上千公里深的高分辨率三维速度模型。结

果显示，在长白山火山下方存在俯冲板片局部插入地幔的现象，而其北侧和南侧则停滞于地幔过渡带。俯冲板片下部的区域和板片空窗区域得到的地幔过渡带660公里不连续界面局部凹陷区一致。俯冲板片从北到南在地幔过渡带内呈现的平滑一下插—平铺的形态变化为板片下方的热物质上涌提供了空间，从而为长白山火山活动提供了深部地幔热源，如图所示。

此外，深源地震震中分布在太平洋板块穿过660界面的弯曲部位，这表明板片局部下插时产生的局部强变形是导致深源地震发生的关键机制。这一发现为深源地震产生的物理机制提供了新视角，并支持板片变形控制地震活动的理论模型，因此和浅源地震一样，深源地震发生的本质也是介质变形的释放。综上所述，这项研究首次将长白山火山活动与深源地震统一归因于太平洋板块局部穿过660公里界面引起的深部动力学过程，二者的发生从根本上受到俯冲板片形态变化的控制。

中国科大地球和空间科学学院博士生、现中国地质科学院助理研究员高磊为论文第一作者，张海洋教授为论文通讯作者，合作者包括英国布里斯托大学Robert Myhill博士和中国科大高级副研究员冷伟教授。

（地球和空间科学学院 科研部）

中国科大电光催化还原降解聚四氟乙烯等永久化学品

本报讯 中国科大康彦彪教授研究团队开发了一种利用超级电容器辅助的电光还原催化体系，为解决由聚四氟乙烯和PFAS降解困难引发的环境问题提供了更多的可能。该研究成果于3月13日在线发表于《德国应用化学》。

电催化可以在温和的条件下实现传统方法无法实现的化学转化，为聚四氟乙烯的降解提供了新的可能。然而，目前利用可见光催化体系对聚四氟乙烯进行处理，脱氟率小于5%。康彦彪教授团队一直致力于惰性碳-杂键等的催化断裂研究，在此基础上，发展了基于扭曲杂键结构的电光催化体系，光还原催化剂的扭曲结构导致其具有优异的单电子转移能力，从而实现了一系列聚四氟乙烯等一系列

定分子中惰性碳-杂键的断裂转化。但是在这一过程中，由于聚四氟乙烯疏水、疏油、不溶于几乎所有的有机溶剂，并且助还原剂溶解性差导致用量高。因此，反应体系为多种固体和液体混合的多相反应体系。而对于光反应而言，大量不溶固体的存在降低了光的透过性，这就导致该反应对光源和体系的分散程度要求极高，对开展大规模的反应不利。

为了解决上述问题，研究团队开发了一种利用超级电容器辅助的电光还原催化体系；利用电化学的方法辅助生成电光催化活性物种，取代电催化反应中溶解性极差的助还原剂。通过光化学和电化学的协同作用，对聚四氟乙烯的碳-氟键进行有效的电子注入，从而实现了

在温和条件下的聚四氟乙烯还原脱氟反应。这一电光还原催化体系的发展，有效避免了单独光催化还原体系中需要过量的助还原剂作为电子供体这一问题，并且将反应的规模由毫克级进一步提升到了克量级。同时该催化体系对于其他小分子的多氟或全氟烷基物质（PFASs）的脱氟也具有有良好的适用性。此外，超级电容器具有充电速度快、工作效率高、能量比高、耐超高温、循环使用寿命长等特点，因此利用具有便携性的超级电容器作为电能的供体，可以在户外以太阳能作为光能来源，实现对聚四氟乙烯的脱氟反应。这为解决由聚四氟乙烯和PFAS降解困难引发的环境问题提供了更多的可能。

在这项研究中，团队采用了包括拉曼光谱、X射线光电子能谱、固体核磁共振、傅里叶变换红外光谱等多种测试手段对聚四氟乙烯脱氟的固体产物进行表征，结果发现产物中含有脂肪结构、芳香结构及含氧官能团，并且具有有规则的碳结构（拉曼D峰）和无规则的碳结构（拉曼D峰）。结合脱氟后的固体产物结构、反应中观测到的副产物等实验结果以及前期研究工作基础和文献报道，对脱氟反应的过程也进行了初步讨论，提出了可能的反应机理。

中国科大博士研究生付家乐为文章第一作者，中国科大康彦彪教授为通讯作者。

（化学与材料科学学院 科研部）

中国科大实现矢量涡旋光场的偏振和相位多维操控

本报讯 中国科大王安廷副教授课题组提出一种基于单个几何相位元件的偏振和相位多维调控方法，成功实现了高阶矢量涡旋光束的产生和调控。相关研究成果于3月17日发表在《激光与光子学评论》上。

自激光问世以来，对激光光场的多维度调控一直是光学领域的研究前沿与应用热点，其中自旋-轨道角动量协同调控下兼具多种物理特性的矢量涡旋光束备受青睐。矢量涡旋光束同时具有横截面各向异性的偏振分布和螺旋相位分布，其偏振和相位可独立地调控，在激光加工、高分辨率成像、光学通信等领域有广阔的应用前景。但目前可调节的矢量涡旋光束生成方法通常需要同时使用多个调制器件或者昂贵的可调液晶相位延迟器，传统矢量涡旋光束产生方法结构复杂、成本高、调控灵活度较低是亟待解决的问题。

鉴于此，研究团队通过单个q波片的自旋-轨道角动量转换对光束的相位和偏振进行调制，并利用传统光学元件组成了可调制相位延迟系统，代替电控液晶相位延迟器对光束的几何相位进行调控，产生了相位和偏振耦合均高达16阶的矢量涡旋光束，实现了对高阶矢量涡旋光束任意偏振分布的灵活操控。团队利用传统傅里叶光学的几何性质描述提出的相位延迟系统的偏振调控过程，利用杂化庞加莱球描述生成的矢量涡旋光束，展示了传统庞加莱球与杂化庞加莱球之间的映射关系，并对矢量涡旋光束传播过程中的偏振演化进行了系统的分析。

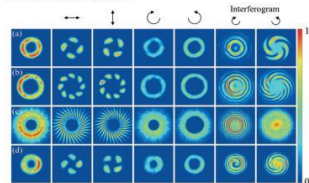


图 高阶矢量涡旋光束的实验生成及表征

中国科大物理学院光学与光学工程系博士后姚俊娜和博士研究生吴永梅为论文共同第一作者，王安廷副教授为论文通讯作者。深圳国际量子研究院、合肥国家实验室刘俊秋研究员，上海理工大学詹其文教授为论文共同作者。

（物理学院 科研部）